Jb. nass. Ver. Naturkde. **140** S. 47-58 5 Abb. Wiesbaden 2019

Grundwasserneubildung in Hessen

Mario Hergesell

Wasserkreislauf, Grundwasserneubildung, Wirkfaktoren, Bodenwasserhaushaltsmodell

Kurzfassung: Grundwasser als Teil des Wasserkreislaufs erfüllt bedeutende ökologische Funktionen, speist die oberirdischen Gewässer und ist für den Menschen als bei weitem wichtigste Süßwasserressource unverzichtbar. Daher müssen Grundwasservorkommen im Hinblick auf Quantität und Qualität geschützt werden. Um einer mengenmäßigen Übernutzung der Grundwasservorkommen im Zusammenhang mit der Gewinnung von Trinkwasser und konkurrierenden Nutzungen wie z. B. landwirtschaftliche Bewässerung oder Industrie vorzubeugen, ist die Kenntnis der Größenordnung der Grundwasserneubildung unabdingbar. Für die flächenhafte und räumlich differenzierte Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag kommt in Hessen und in benachbarten Bundesländern inzwischen ein zweistufiges Verfahren zum Einsatz, bei dem das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW mit einem speziell für Hessen entwickelten Regressionsmodell gekoppelt wird.

Demnach wurden im 30-jährigen Mittel 1971–2000 in Hessen etwa 12 % des Niederschlags in Höhe von rd. 845 mm zu Grundwasser, das entspricht rechnerisch 101 mm/a. Umgerechnet auf die Fläche Hessens (rd. 21.115 km^2) wurden im Zeitraum 1971–2000 jährlich rund 2,13 Mrd. m^3 Grundwasser neu gebildet. Demgegenüber wurden im Durchschnitt jährlich rund 407 Mio. m^3 Grundwasser entnommen. Der Vergleich zeigt somit, dass im langjährigen Mittel hessenweit jährlich rd. 5-fach mehr Grundwasser neu gebildet als gefördert wurde.

Groundwater recharge in Hesse

Water cycle, groundwater recharge, effective factors, soil-water balance model

Abstract: Groundwater as part of the water cycle performs major ecological functions, feeds surface waters and is vital for the well-being of people as the most important fresh water resource. Therefore, groundwater reserves must be protected with regard to quantity and quality. To prevent an overexploitation of groundwater in connection with drinking-water abstraction and competing utilizations such as agricultural irrigation or industry, the knowledge on the rate of groundwater recharge from precipitation is imperative. Nowadays, for the area-wide and spatially differentiated examination of groundwater recharge from precipitation, the specified public authorities in Hesse and adjacent federal countries apply a two-step procedure. The characteristic of this method is a link between the soil water balance model GWN-BW and a regression model especially developed for applications in Hesse.

Therefore, related to the long-term period 1971–2000 in Hesse about 12 percent of the average precipitation of 845 mm annually resulted in a groundwater recharge; that corresponded to an average recharge of 101 mm per year. Converted to the area of Hesse (around 21,115 km^2), in this 30 years period about 2.13 million cubic meters of groundwater were replenished annually. By contrast, in this period about 407 million cubic meters of groundwater were extracted annually. Thus, the comparison illustrates, that all over Hesse the average annual groundwater recharge was five times more than its extraction.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

Rund 70 % der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt. Jedoch sind nur etwa 2,5 % der globalen Wasserressource Süßwasser, wobei hiervon wiederum rund 69 % in Schnee und Eis gebunden und vor allem an den Polen vorhanden sind (Galler 1999). Grundwasser ist vor diesem Hintergrund eine wertvolle Süßwasserressource, deren wie bei uns in Hessen weitgehend uneingeschränkte Nutzung, keine Selbstverständlichkeit ist.

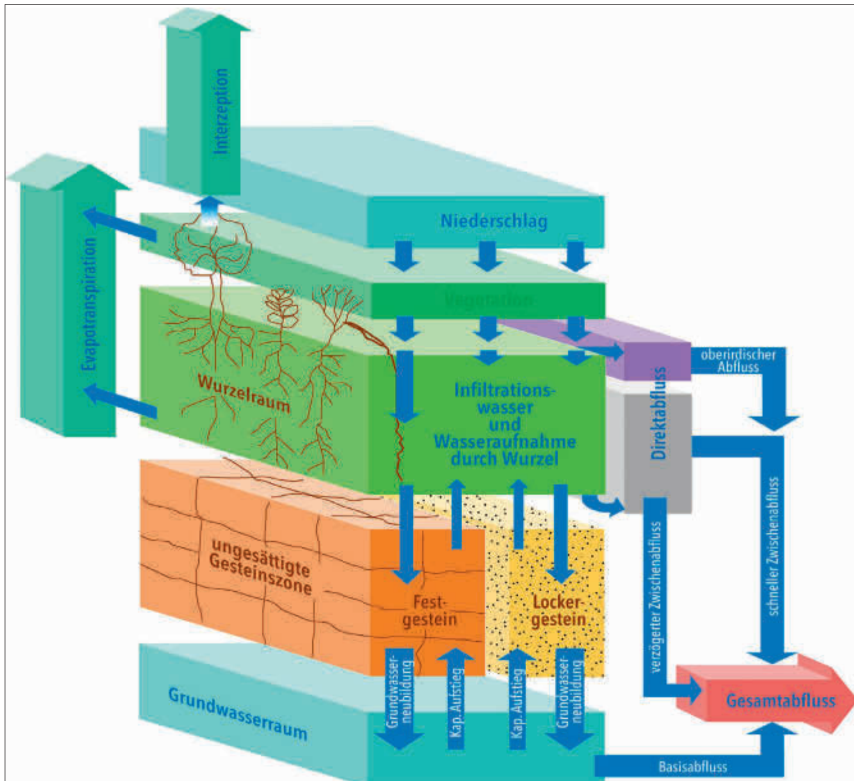


Abbildung 1: Der terrestrische Wasserhaushalt (Dörhöfer et al. 2001).
Figure 1: The terrestrial water balance (Dörhöfer et al. 2001).

Grundwasser erfüllt wichtige ökologische Funktionen. Für Mensch, Tier und Pflanze ist das Grundwasser die wichtigste Ressource zum Überleben und gilt daher als besonders schützenswert. Oberflächennahe Grundwasservorkommen versorgen Pflanzen mit Wasser und bilden wertvolle Feuchtbiotope. Das Grundwasser tritt in Quellen zu Tage und speist Bäche und Flüsse. Qualität und Menge des Grundwassers beeinflussen damit auch die oberirdischen Gewässer. In Deutschland stammen mehr als 70 Prozent des Trinkwassers aus dem Grundwasser, es ist hierzulande daher die wichtigste Trinkwasserressource. In Hessen wird das Trinkwasser sogar nahezu vollständig aus dem Grundwasser gewonnen.

Grundwasser ist Teil des Wasserkreislaufs (Abb. 1). Ein großer Anteil des auf die Erde fallenden Niederschlags gelangt durch verschiedene Verdunstungsprozesse (Transpiration, Evaporation, Interzeption), welche am Boden, an bzw. durch Pflanzen oder an Wasserflächen stattfinden, direkt wieder in die Atmosphäre. Die nicht verdunsteten Niederschlagsanteile (Gesamtabfluss) gelangen teils als Direktabfluss (Summe aus Oberflächenabfluss und oberflächennahem Zwischenabfluss) mit einer geringen zeitlichen Verzögerung in die oberirdischen Gewässer. Der restliche Teil versickert und gelangt nach einer Passage durch die lufterfüllte ungesättigte Gesteinszone mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung in den Grundwasserraum.

Unter **Grundwasserneubildung** wird laut DIN 4049-3 der Zufluss von in den Boden infiltriertem Wasser zum Grundwasser verstanden. Das Volumen des auf einer bestimmten Fläche infiltrierten Wassers in einer bestimmten Zeit ergibt die Grundwasserneubildungsrate. Wie beim Abfluss wird unterschieden zwischen der Grundwasserneubildungshöhe [mm/a] und der Grundwasserneubildungsspende [$l/(s \cdot km^2)$]. Letztere wird auf eine definierte Fläche, das unterirdische Einzugsgebiet, bezogen (Hölting & Coldewey 2013).

Als ein Teilprozess des terrestrischen Wasserkreislaufs (Abb. 1) ist die Grundwasserneubildung von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig und daher ein sehr komplexer Prozess. Neben den klimatischen Bedingungen (Niederschlag und Verdunstung) wird die Grundwasserneubildung durch die Landnutzung, die Bodenart, den geologischer Aufbau des Untergrunds, die Topographie, den Grundwasserflurabstand und durch die Lage zu oberirdischen Gewässern beeinflusst. Neben der Niederschlagsversickerung können auch versickernde oberirdische Gewässer zur Grundwasserneubildung beitragen. Zudem kann der unterirdische Zustrom aus Nachbargebieten das Grundwasserdargebot erhöhen.

Stellt man die erweiterte terrestrische Wasserhaushaltsgleichung um, lässt sich die Grundwasserneubildung vereinfacht durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$GWN = N - ET - I - A_d - \Delta S$$

mit

GWN Grundwasserneubildung
N Niederschlag
ET Evapotranspiration

I Interzeption
A_d Direktabfluss
ΔS Speicheränderung

Aufgrund des jahreszeitlichen Verlaufs der klimatischen Einflussgrößen, der daraus resultierenden Wachstumsperioden und der regional verschiedenen Gebietseigenschaften weist die Grundwasserneubildung eine sowohl zeitliche als auch räumliche Variabilität auf. In Hessen findet die aus dem Niederschlag resultierende Grundwasserneubildung überwiegend während des Winterhalbjahres statt, wenn die Verdunstung sowie der Wasserverbrauch durch die Vegetation gering ist und der Niederschlag daher größtenteils versickern kann.

Auch versickernde oberirdische Gewässer tragen zur Grundwasserneubildung bei, dieser Anteil ist auf die Landesfläche bezogen jedoch marginal und bleibt daher bei der Bilanz unberücksichtigt.

Äußerst unwillkommen ist eine Grundwasserneubildung, die aus undichter Kanalisation austretendem Abwasser resultiert, da es dadurch zu einer qualitativen Beeinträchtigung der Grundwasservorräte kommt. Mangels Daten sind auch dazu keine Aussagen möglich.

Ein Spezialfall ist das wegen der Trinkwassergewinnung für die Rhein-Main-Region wasserwirtschaftlich stark beanspruchte Hessische Ried, in dem seit 1989 zwecks Stabilisierung des Grundwasserstandes eine Anreicherung des Grundwassers durch Infiltration von aufbereitetem Rheinwasser vorgenommen wird. Es handelt sich somit um eine künstliche Grundwasserneubildung.

2 Die wasserwirtschaftliche Bedeutung der Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung ist eine wichtige hydrogeologische Kenngröße für die Beurteilung des **mengenmäßigen** Grundwasserzustands. Sie ist eine zentrale Größe bei der nachhaltigen Bewirtschaftung von Grundwasser und ein Maß für die natürliche Regenerationsfähigkeit der Grundwasserressourcen. Das nutzbare Grundwasserdargebot ist durch die Grundwasserneubildung nach oben begrenzt, meist jedoch erheblich kleiner als diese. Die Gegenüberstellung von Grundwasserdargebot und Grundwasserbedarf ist eine zwingende Voraussetzung für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasservorkommen und ist für die mengenmäßige Beschreibung der Grundwasserkörper nach der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) sowie für wasserrechtliche Genehmigungsverfahren zur Grundwasserentnahme vorgeschrieben. So schreibt Artikel 4 der EU-WRRL vor, dass Grundwasservorkommen nicht übernutzt werden dürfen. Wird einem Grundwasserkörper mehr Wasser entnommen als neu gebildet wird, kann es zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels kommen, was eine Schädigung grundwasserabhängiger Biotope und Feuchtgebiete, land- und forstwirtschaftliche Ertragsminderungen sowie Gebäude- und sonstiger In-

frastrukturschäden infolge ungleichmäßiger Setzung des Untergrundes nach sich ziehen kann.

Die Grundwasserneubildung hat nicht nur einen Einfluss auf den mengenmäßigen Zustand, sondern auch auf die **Beschaffenheit** des Grundwassers. Die Menge an Wasser, die durch die Bodenpassage und die Gesteine in das Grundwasser gelangt, kann Einfluss auf die Konzentration von Stoffen im Grundwasser haben. Einerseits ist mit einer höheren Grundwasserneubildung ein verstärktes Auswaschen von Stoffen möglich, andererseits kann es durch eine erhöhte Grundwasserneubildung auch zu Verdünnungseffekten im Grundwasser kommen. Flächendetaillierte Kenntnisse über die Grundwasserneubildung werden daher auch für die Abschätzung des Gefährdungspotentials des Grundwassers durch den Eintrag von Schadstoffen, wie z. B. durch Nitratauswaschung, benötigt.

Regional differenzierte Informationen zur Grundwasserneubildung werden in Hessen routinemäßig für unterschiedliche hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Fragestellungen und Aufgaben verwendet:

- Dimensionierung von Wasserrechten (Wasserrechtsverfahren)
  - Ausweisung von Wasserschutzgebieten
  - Ermittlung von Verweilzeiten und der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (= Gesteinspaket zwischen Gelände- und Grundwasseroberfläche)
- Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser
- Bereitstellung von Eingangsdaten für Grundwassermodelle
- Beurteilung des mengenmäßigen Zustands der Grundwasserkörper gemäß EU-WRRL

3 Ermittlung der Grundwasserneubildung

Direkte Messungen der Grundwasserneubildung bzw. der Sickerwasserrate sind nur punktuell mit Lysimetern möglich, die für großräumige Untersuchungen nicht in Frage kommen. Für die indirekte Ermittlung der Grundwasserneubildung kommen in der Praxis unterschiedliche Methoden je nach Fragestellung und Genauigkeitsanspruch zum Einsatz, wie z. B. die Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate aus dem Abfluss in oberirdischen Gewässern insbesondere in Zeiten ohne wesentlichen Niederschlag, aus der Schwankung des Grundwasserspiegels in Grundwassermessstellen oder aus Wasserwerksdaten, sofern das unterirdische Einzugsgebiet hinreichend genau bekannt ist. Diese Verfahren liefern auf meist kleine Gebiete bezogen eher eine summarische Größenordnung der Grundwasserneubildung. Für die flächenhafte und räumlich differenzierte Ermittlung der Grundwasserneubildung kommen mittlerweile verbreitet Bodenwasserhaushaltmodelle zum Einsatz. Die Eingangsparameter dieser Modelle, deren gemeinsame Basis die Wasserhaushaltsgleichung ist, müssen flächenhaft verfügbar sein. Die unterschiedlichen Modellansätze unterscheiden sich hin-

sichtlich der Differenzierung der einzelnen berücksichtigten Prozesse und der zeitlichen und räumlichen Auflösung.

Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist nicht nur von dem gewählten Verfahren, sondern auch von der Qualität der Eingangsdaten bzw. Fehlern bei der Datenermittlung abhängig. Bei aller noch so sorgfältigen und genauen Erfassung der für die Berechnung notwendigen Parameter ist die Genauigkeit der Ergebnisse begrenzt. Dafür sind die geologischen und meteorologischen Inhomogenitäten häufig zu groß und nicht voll erfassbar (Hölting & Coldewey 2013). Deshalb sollten für die Ermittlung der Grundwasserneubildung möglichst unterschiedliche Verfahren zur Anwendung kommen.

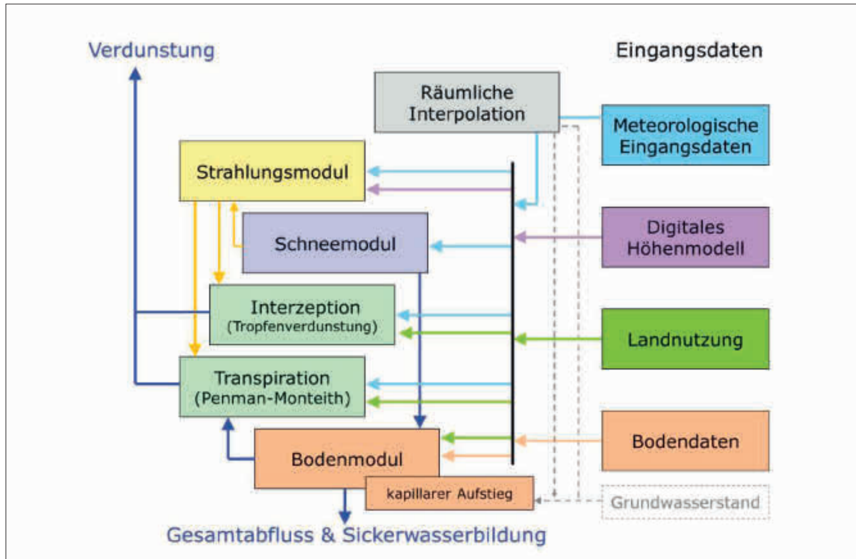


Abbildung 2: Modularer Aufbau des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW und schematische Darstellung der benötigten Eingangsdaten (Kopp et al. 2018).

Figure 2: Modular structure and input data required by the soil-water balance model (Kopp et al. 2018).

In Hessen kommt für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung ein zweistufiges Verfahren zum Einsatz, bei dem das Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW (KLIWA 2012; Gudera & Morhard 2015) mit einem speziell für Hessen entwickelten Regressionsmodell (Hergesell & Berthold 2005) gekoppelt wird. GWN-BW ist ein deterministisches, flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes sowie zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge. Das Modell wird im Rahmen des Kooperationsprojektes KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) länderübergreifend in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen angewendet

(Kopp et al.). In den einzelnen Teilmodulen kommen sowohl physikalisch basierte als auch konzeptionelle Ansätze zur Beschreibung der an den Vorgängen von Verdunstung und Sickerwasserbildung beteiligten Prozesse zur Anwendung. Die Berechnung erfolgt auf Basis von Tagesschritten, die räumliche Diskretisierung erfolgt in Hessen durch ein zugrunde gelegtes 100 m-Raster.

Für die Simulation des Bodenwasserhaushalts gehen als meteorologische Eingangsdaten Tageswerte für Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer und Windstärke ein. Bis auf den Niederschlag werden hierzu Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet, die mit GWN-BW räumlich interpoliert werden. Bei den Niederschlagsdaten wird auf die vom DWD regionalisierten REGNIE-Rasterdaten (= Regionalisierte Niederschlagshöhen) zurückgegriffen. Die für die Strahlungsberechnung benötigten Parameter Hangneigung und Exposition werden aus dem digitalen Höhenmodell abgeleitet. Als Landnutzung werden ATKIS-Daten verwendet, die in 16 simulationsrelevante Nutzungsklassen klassifiziert wurden. Die wichtigste Kenngröße zur Simulation des Bodenwasserhaushalts ist die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (nFKWe). Diese wird auf Grundlage der Bodenflächendaten Hessen 1 : 50000 aus der nutzungsspezifischen Durchwurzelungstiefe, dem Bodensubstrat und dessen Gründigkeit abgeleitet. Sie stellt den entleer- bzw. auffüllbaren Bodenspeicher dar. Darüber hinaus werden Angaben zu Substrat, Gründigkeit und mittlerem Grundwasserflurabstand benötigt, um den kapillaren Aufstieg zu berücksichtigen.

Die mit GWN-BW berechnete Sickerwasserrate entspricht in Gebieten mit vernachlässigbaren schnellen lateralen Abflusskomponenten (z. B. in den meist mehr oder weniger horizontal liegenden Porengrundwasserleitern) der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. In Festgesteinsgebieten, insbesondere im Falle stärker ausgeprägter Morphologie, kann die mit GWN-BW berechnete Sickerwasserbildung nicht direkt mit der Grundwasserneubildung gleichgesetzt werden, da ein Teil des gebildeten Sickerwassers beispielsweise im Falle dachziegelartig Hänge bedeckender Schuttmassen oberhalb des Grundwasserraums als sog Zwischenabfluss seitlich abgelenkt wird. Daher wird in reliefierten Festgesteinsgebieten die Sickerwasserrate unter Verwendung des auf Basis von Abflussmessungen regressionsanalytisch ermittelten und regionalisierten Baseflow-Index (BFI) in die schnellen lateralen Direktabflussanteile und der Grundwasserneubildung separiert.

Anzumerken ist, dass dieses Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag ursprünglich für die Ermittlung langjähriger Mittelwerte der Grundwasserneubildung entwickelt wurde, da bei größeren Grundwasserflurabständen in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Verhältnissen neugebildetes Sickerwasser im Untergrund unter Umständen Jahre unterwegs sein kann, bis es die Grundwasseroberfläche erreicht. Unter Zurückstellung fachlicher Bedenken und Inkaufnahme gewisser Modellunsicherheiten wird dieses hier vorgestellte Verfahren im Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt

und Geologie (HLNUG) trotzdem für die Ermittlung auch von von jährlichen Grundwasserneubildungsraten bzw. -spenden eingesetzt, um insbesondere wasserwirtschaftlichen Berichtspflichten genügen zu können.

4 Ergebnisse

Auf der Grundlage korrigierter Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) fielen in Hessen im 30-jährigen Mittel der Periode 1971–2000 rund 845 mm Niederschlag pro Jahr. Im Landesmittel verdunsteten rund 70 % des gefallenen Niederschlags (reale Verdunstung: 589 mm/a), die verbliebenen 30 % standen als Gesamtabfluss (256 mm/a) für die verschiedenen Abflussprozesse zur Verfügung. Vom Gesamtabfluss in Höhe von 256 mm/a entfielen 155 mm/a auf den Direktabfluss und 101 mm/a auf die Grundwasserneubildung aus Niederschlag, d. h. nur 12 % des Niederschlags wurden zu Grundwasser.

Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag ist für die Referenzperiode 1971–2000 in Abbildung 3 als Übersichtskarte dargestellt. Aufgrund der vielen Einflussgrößen ist die Grundwasserneubildung durch ein sehr heterogenes Verteilungsmuster gekennzeichnet. Die Verteilung des Niederschlags ist deutlich zu erkennen. Regional und lokal treten allerdings andere Einflussgrößen in den Vordergrund. So sind z. B. die niedrigeren Grundwasserneubildungshöhen im Rheinischen Schiefergebirge auf die dort anzutreffenden geringen hydraulischen Durchlässigkeiten und Speicherkapazitäten der Gesteine des Untergrundes zurückzuführen.

Umgerechnet auf die Fläche Hessens (rd. 21.115 km^2) wurden im langjährigen Mittel (1971–2000) jährlich rund 2,13 Mrd. m^3 Grundwasser neu gebildet. Demgegenüber wurden im Mittel jährlich rund 407 Mio. m^3 Grundwasser entnommen. Der Vergleich zeigt, dass im langjährigen Mittel hessenweit jährlich rd. 5-fach mehr Grundwasser neu gebildet als gefördert wurde. Allerdings war die Grundwasserneubildung durch eine ausgeprägte jährliche und periodische Variabilität gekennzeichnet.

In Abbildung 4 ist die Entwicklung der Grundwasserneubildung von 1951 bis 2017 dargestellt (KLIWA 2017). Die Jahreswerte unterliegen extremen Schwankungen, der Schwankungsbereich beträgt mehr als 200 mm. Für die Grundwasserneubildung ist über den gesamten Betrachtungszeitraum kein einheitlicher Trend erkennbar. Auffällig ist, dass die bis zum Jahr 2003 zu beobachtende extreme jährliche Variabilität danach deutlich weniger ausgeprägt ist und die jährliche Grundwasserneubildung bis auf die Jahre 2007 und 2013 unterhalb des langjährigen Mittelwertes liegt. Ausgeprägte niederschlagsreiche Jahre, sog. Nassjahre, wurden in Hessen seit 2003 nicht mehr beobachtet. Besonders die letzte halbe Dekade zeichnet sich durch sehr niedrige Grundwasserneubildungshöhen aus.

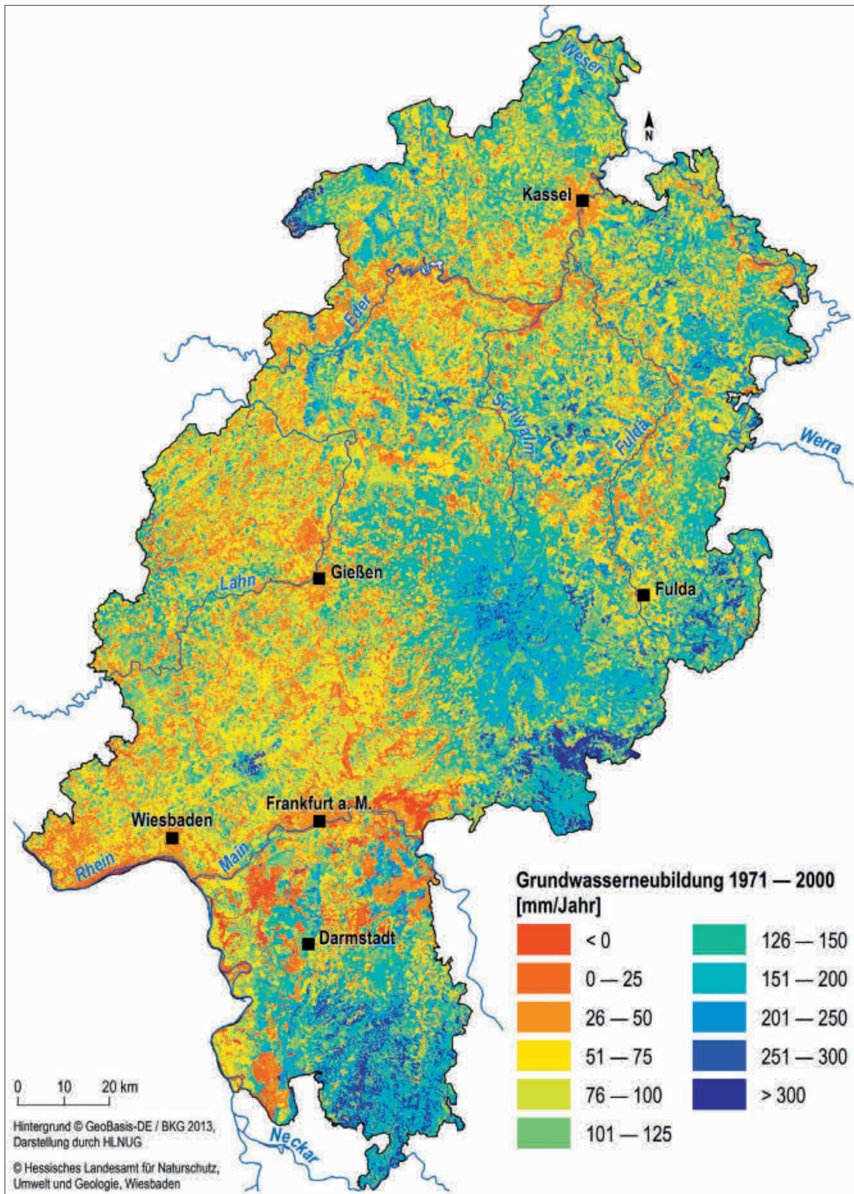


Abbildung 3: Grundwasserneubildung aus Niederschlag (30-jähriges Mittel 1971–2000).
Figure 3: Groundwater recharge from precipitation (average of the 30-year period 1971–2000).

Die Variabilität der Grundwasserneubildung drückt sich in **Schwankungen des Grundwasserstandes** als Folge für die Vorratsänderung im Grundwasserleiter aus. In Abbildung 5 ist eine typische Grundwasserstandsganglinie darge-

stellt. Sie zeigt die Entwickung des Grundwasserstandes von 1965 bis 2018 in der Grundwassermessstelle Bauschheim Nr. 527244, die sich im Porengrundwasserleiter des nördlichen Oberrheingrabens befindet. Da sie tektonisch bedingt

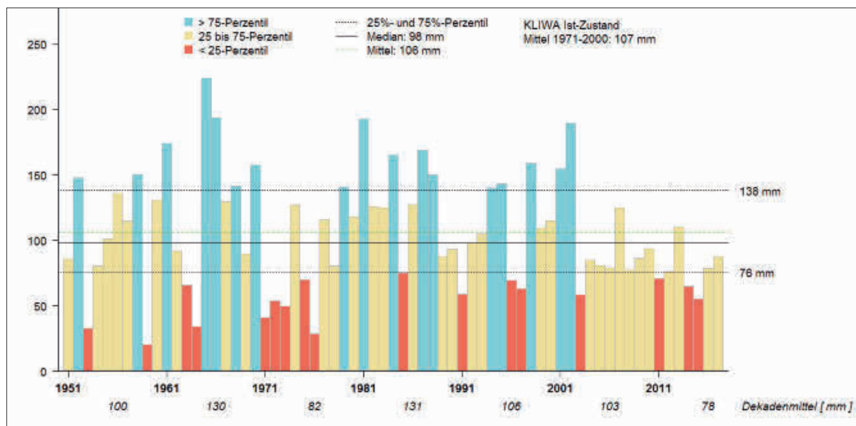


Abbildung 4: Entwicklung der Grundwasserneubildung (KLIWA 2017, aktualisiert).
Figure 4: Changes in groundwater recharge (KLIWA 2017, updated).

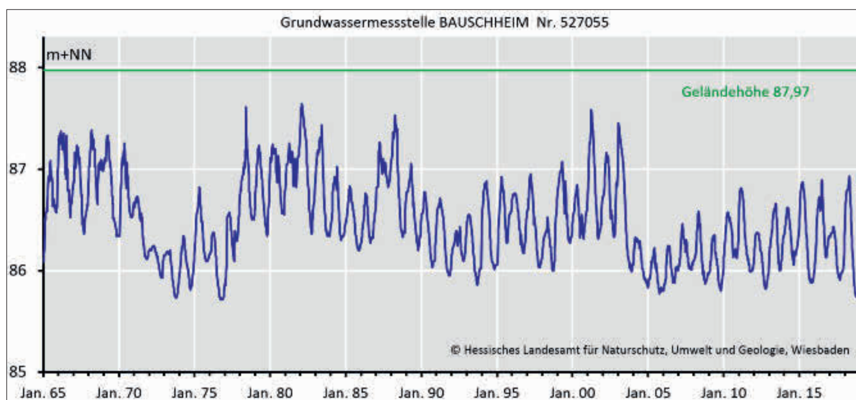


Abbildung 5: Ganglinie des Grundwasserstands in der Grundwassermessstelle Bauschheim Nr. 527055.
Figure 5: Groundwater hydrograph line of the monitoring well Bauschheim No 527055.

auf einem „Wasserberg" liegt, ist der Grundwasserspiegelgang im Gegensatz zu vielen anderen Messstellen im Hessischen Ried nicht durch Trinkwasserbrunnen beeinflusst.

Die Grundwasserstände sind jahreszeitlich geprägt mit steigenden Wasserständen im Winterhalbjahr und sinkenden im Sommer und Herbst. Hierbei handelt es sich um saisonale Schwankungen, die man in der Regel für jedes Jahr beobachten kann. Die saisonalen Schwankungen werden von Trocken- und

Nassperioden überlagert, den periodischen Schwankungen. Die saisonalen und periodischen Schwankungen können wiederum von langfristigen Trends überlagert werden. Die Messstelle Bauschheim zeigt hohe Grundwasserstände in den 1960er-Jahren. Die Trockenperiode von 1971 bis 1976 war mit deutlich sinkenden Wasserständen ausgeprägt. Der Wiederanstieg in den 1980er Jahren erreichte die hohen Wasserstände früherer Jahre. Nach einer erneuten Trockenperiode von 1990 bis 1993 stieg das Grundwasser bis zu einem Höhepunkt im Frühjahr 2001. Nach dem Trockenjahr 2003 sanken die Grundwasserstände stark ab und blieben bis heute auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Infolge der langandauernden Trockenheit und hohen Temperaturen seit dem Frühjahr 2018 wurden an der Messstelle am Ende des hydrologischen Sommerhalbjahres 2018 sehr niedrige Grundwasserstände registriert.

5 Hinweise für die Interpretation der Modellergebnisse

Bei der Verwendung der Modellergebnisse müssen die Vereinfachungen des Modells berücksichtigt werden. Auch wenn die Modellergebnisse hessenweit im 100 m-Raster vorliegen, sind die Modellergebnisse nicht dafür geeignet, um einzelne Rasterwerte für quantitative Auswertungen (Bilanzierungen) zu verwenden. Dies liegt in erster Linie an dem Maßstab der Eingangsdaten (z. B. HÜK 200, ATKIS-Landnutzung). Das Modell wurde in erster Linie für großräumige Betrachtungen auf regionaler Maßstabsebene (1:200.000) konzipiert. Für die Abschätzung der Grundwasserneubildung in Siedlungsgebieten wird zwischen acht Versiegelungsgraden unterschieden. Da für versiegelte Gebiete keine Bodenkennwerte flächenhaft vorhanden und die Versiegelungsgrade auf der Grundlage von ATKIS-Daten nicht immer eindeutig zu bestimmen sind, sind die Ergebnisse für Ortslagen nur als grobe Näherungswerte zu verstehen. Die reale Grundwasserneubildung kann lokal deutlich von den ermittelten Werten abweichen.

Grundwasseraustritt über schwebenden Grundwasserkörpern, Influenz und Effluenz entlang von oberirdischen Gewässern, laterale Grundwasserströmung (Randzustrom aus Nachbargebieten) sowie die Zusickerung und Aussickerung von Grundwasser aus bzw. in andere Grundwasserleiter werden von dem Modell nicht berücksichtigt. Daher muss für die standortbezogene Beurteilung des Grundwasserdargebotes auf lokaler Maßstabebene den lokalen, im Modell nicht abgebildeten Gegebenheiten zusätzlich Rechnung getragen werden.

Die ermittelte Grundwasserneubildung aus Niederschlag ist in der Regel nicht mit dem Grundwasserdargebot gleichzusetzen. Die Grundwasserneubildung begrenzt das nutzbare Grundwasserdargebot nach oben und stellt somit das maximal mögliche oder potentielle Dargebot dar. Meist fällt das nutzbare Grundwasserdargebot u. a. aus brunnentechnischen Gründen oder wirtschaftlichen Überlegungen aber erheblich kleiner als die Grundwasserneubildung aus. Das gilt insbesondere für an Festgesteine gebundene Kluftgrundwasserleiter. Die

Ergiebigkeit des Grundwasservorkommens und die Zeitskala, auf der der Grundwasserumsatz im Grundwasserleiter erfolgt, sind für die Grundwasserneubildung nicht maßgeblich, für das genutzte Dargebot dagegen sehr wohl.

6 Literatur

Dörhöfer, G., Kunkel, R., Tetzlaff, B. & Wendland, F. (2001): Der natürliche Grundwasserhaushalt in Niedersachsen. – Arbeitsh. Wasser, **1**: 109-167; Hannover.

Galler, J. (1999): Lehrbuch Umweltschutz – Fakten, Kreisläufe, Maßnahmen. – 137-144; Landsberg (ecomed).

Gudera, T. & Morhard, A. (2015): Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWN-BW. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **59 (5)**: 205-216; Koblenz (DOI: 10.5675/HyWa_2015,5_1).

Hergesell, M. & Berthold, G. (2004): Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Baseflow-Index (BFI). – Jahresbericht des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, **2004**: 47-66; Wiesbaden.

Hölting, B. & Coldewey, W.G. (2013): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 8. Aufl. – XXXVII, 438 S.; Heidelberg (Spektrum Akad.-Verl.).

KLIWA (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien. – KLIWA Berichte, **17**: 112 S.; Karlsruhe (https://www.kliwa.de/_download/KLIWA Heft17.pdf).

KLIWA (2017): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951 2015). – KLIWA-Berichte., **21**: 102 S.; Karlsruhe (https://www.kliwa.de/_download/KLIWAHeft21.pdf).

Kopp, B., Baumeister, C., Gudera, T., Hergesell, M., Kampf, J., Morhard, A. & Neumann, J. (2018): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen von 1951 bis 2015. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **62 (2)**: 62-76; Koblenz (DOI: 10.5675/HyWa_2018.,2_1).

Mario Hergesell
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Rheingaustr. 186
65203 Wiesbaden
Tel.: 0611/6939-704
E-Mail: mario.hergesell@hlnug.hessen.de

Manuskripteingang: 18. Oktober 2018